

PROCEDE D'ESTIMATION DE DISTANCE CURVILIGNE POUR MOBILE A MANOEUVRABILITE LIMITEE

L'invention concerne la navigation de terrain et plus
5 particulièrement les estimations de distance curviligne prenant en compte
d'éventuels obstacles à contourner.

La demanderesse a déjà proposé, dans une demande de brevet
français déposée le 26/9/2003, sous le n°0311320, un procédé d'estimation
des distances, par rapport à un point de référence, des points d'une carte
10 extraite d'une base de données d'élévation du terrain. Ce procédé met en
œuvre une transformée de distance par propagation et s'accommode
d'obstacles à contourner dont la forme peut évoluer au cours du temps,
comme des reliefs vus par un aéronef ayant un profil vertical de vol imposé
avec des variations d'altitude qui font qu'un même relief menaçant à un
15 certain moment ne l'est plus à un autre ou inversement. La transformée de
distance par propagation sert à établir une carte de distances couvrant une
zone plus ou moins grande où évolue un mobile et ayant la position
instantanée du mobile pour origine des mesures de distance. Cette carte de
distances, qui n'est pas destinée à être affichée, est utilisée pour tracer une
20 carte géographique qui, elle, est affichée et représente la zone d'évolution
découpée en régions montrées en fausses couleurs et délimitées en fonction
de la possibilité du mobile à les franchir et du temps que celui-ci mettrait à
les atteindre lorsqu'elles sont franchissables, par exemple rouge pour des
obstacles infranchissables, jaune pour des régions lointaines d'accès et verte
25 pour les régions proches d'accès.

Si les estimations de distance faites lors de l'établissement de la
carte de distances prennent en compte les obstacles à contourner et
l'évolution de la menace qu'ils représentent pour le mobile en fonction du
degré d'accomplissement de sa mission, elles ne tiennent pas compte de la
30 manœuvrabilité du mobile si bien que les estimations de distance faites
manquent de réalisme pour certains points situés dans le proche voisinage
du mobile. En effet, notamment dans le cas d'un aéronef, les estimations de
distance sont menées de la même manière, que le point considéré soit placé
devant ou derrière l'aéronef, alors que l'aéronef peut atteindre sans
35 encombre un point placé devant lui mais doit faire un tour complet sur lui-
même pour atteindre un point placé derrière lui, tour complet dont l'ampleur

dépend de sa capacité à virer, du côté où est entamé le virage : côté sous le vent ou côté contre le vent, et de l'intensité du vent de travers.

La présente invention a pour but d'assurer la cohérence et le réalisme des estimations de distance curviligne, obtenues par le procédé décrit dans la demande de brevet français précitée ou par un autre procédé, en leur interdisant d'être mesurées sur des trajets hors d'atteinte du mobile effectuant la navigation de terrain car exigeant des manœuvres dépassant ses possibilités.

10

Elle a pour objet un procédé d'estimation de distance curviligne au sein d'une zone où évolue un mobile à manœuvrabilité limitée et qui renferme des obstacles éventuels à contourner, zone dite zone d'évolution, dans lequel est établie une carte de distances couvrant la zone d'évolution et ayant une origine des mesures de distance proche de la position instantanée du mobile, caractérisé en ce qu'il consiste, lors de l'établissement de la carte de distances, à compléter les obstacles éventuels à contourner par un obstacle supplémentaire à contourner qui est lié au mobile et placé dans son voisinage, et qui englobe des étendues du proche voisinage du mobile, considérées comme inaccessibles pour le mobile du fait des limites de sa manœuvrabilité.

15

Avantageusement, l'obstacle supplémentaire est de forme concave et disposé dans le voisinage de la position instantanée du mobile de manière que sa concavité soit tournée dans la direction du déplacement du mobile et englobe la position instantanée du mobile.

25

Avantageusement, l'obstacle supplémentaire a une forme en U, l'ouverture du U étant tournée dans la direction du déplacement du mobile et englobant la position instantanée du mobile.

30

Avantageusement, l'obstacle supplémentaire a une forme de demi-lune, l'ouverture de la demi-lune étant tournée dans la direction de déplacement du mobile et englobant la position instantanée du mobile.

35

Avantageusement, l'obstacle supplémentaire a une forme à deux lobes en aile de papillon, placés de part et d'autre de la position instantanée du mobile et ayant une tangente commune orientée dans la direction de déplacement du mobile.

5

Avantageusement, lorsque le mobile est un aéronef, le contour de l'obstacle supplémentaire comporte des parties correspondant aux projections au sol de deux trajectoires circulaires liées à l'aéronef, admettant une tangente extérieure commune au niveau de l'aéronef, orientée dans la direction du mouvement du mobile et ayant un rayon égal au rayon de courbure du virage le plus serré admis pour l'aéronef au moment considéré.

Avantageusement, lorsque le mobile est un aéronef soumis à un vent de travers, le contour de l'obstacle supplémentaire comporte des parties de cycloïdes correspondant aux projections au sol de deux trajectoires circulaires liées à l'aéronef, ayant un rayon égal au rayon de courbure du virage le plus serré admis pour l'aéronef au moment considéré.

Avantageusement, lorsque le mobile est un aéronef soumis à un vent de travers, le contour de l'obstacle supplémentaire consiste en deux lobes de cycloïde limités à leurs parties allant de leur point de départ, qui est la position instantanée de l'aéronef, à leur deuxième intersection avec des droites allant de la position instantanée de l'aéronef à des positions virtuelles sur les lobes de cycloïdes correspondant pour l'aéronef à un angle de changement de route arbitraire.

Avantageusement, lorsque le mobile est un aéronef soumis à un vent de travers, le contour de l'obstacle supplémentaire consiste en deux lobes de cycloïde limités à leurs parties allant de leur point de départ, qui est la position instantanée de l'aéronef, à leur deuxième intersection avec des droites allant de la position instantanée de l'aéronef à des positions virtuelles sur les lobes de cycloïdes correspondant pour l'aéronef à un angle de changement de route de 180 degrés.

Avantageusement, lorsque le mobile est un aéronef soumis à un vent de travers et la carte de distances établie dans un repère géographique utilisant les longitudes et les latitudes, le contour de l'obstacle supplémentaire présente deux parties en lobe de cycloïde répondant au système d'équations paramétriques :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_g = \begin{pmatrix} WS_{x_g} t - \delta \cdot R \cdot \cos(\omega t + \gamma_g) + C_{x_g} \\ WS_{y_g} t + R \cdot \sin(\omega t + \gamma_g) + C_{y_g} \end{pmatrix}$$

x et y étant les coordonnées abscisse et ordonnée d'un point dans le repère géographique de la carte de distances,

10 $\begin{pmatrix} WS_x \\ WS_y \end{pmatrix}$ étant le vecteur vent exprimé dans le repère géographique de la carte de distances, avec

$$R = \frac{TAS^2}{g \cdot \tan \varphi_{roll}}$$

$$\omega = \frac{TAS}{R} = \frac{g \cdot \tan \varphi_{roll}}{TAS}$$

15

TAS étant l'amplitude de la vitesse air de l'aéronef,

φ_{roll} étant l'angle de roulis de l'aéronef pendant la manœuvre,

γ étant un facteur dépendant des conditions initiales,

δ étant un coefficient égal à +1 pour un virage à droite et -1 pour un virage à

20 gauche, et avec

$$C_{x_g} = Long + \delta \cdot R \cdot \cos(\gamma_g)$$

$$C_{y_g} = Lat - R \cdot \sin(\gamma_g)$$

$$\gamma_g = \delta \cdot Heading + k \cdot \Pi$$

25 long étant la longitude de la position instantanée de l'aéronef, lat étant la latitude de la position instantanée de l'aéronef, et heading étant le cap de l'aéronef.

5

Avantageusement, l'obstacle supplémentaire tenant compte des limites de manœuvrabilité du mobile est privé de la surface d'un secteur angulaire partant du mobile et ayant son ouverture tournée dans la direction du mouvement du mobile.

5

Avantageusement, lorsque la carte de distances se présente sous la forme d'une grille de cellules correspondant aux éléments d'une base de données d'élévation du terrain maillant le terrain d'évolution du mobile, l'obstacle supplémentaire tenant compte des limites de manœuvrabilité du mobile est privé des cellules recouvertes en totalité ou en partie par un secteur angulaire partant du mobile et ayant son ouverture tournée dans la direction du mobile.

Avantageusement, lorsque la carte de distances résulte de l'application, aux pixels d'une image formée par une carte tirée d'une base de données d'élévation du terrain, d'une transformée de distance qui utilise un masque de chanfrein répertoriant les distances d'un pixel en analyse par rapport aux pixels les plus proches dits pixels du voisinage et qui a des axes de propagation orientés comme les directions des pixels du voisinage par rapport au pixel en analyse dans le masque de chanfrein, l'obstacle supplémentaire tenant compte de la mobilité de l'aéronef est privé d'un secteur angulaire partant d'un pixel proche du mobile, pris pour origine des mesures de distance, et ayant son ouverture orientée selon l'axe de propagation le plus proche de la direction du mouvement du mobile.

25

Avantageusement, lorsque la carte de distances résulte de l'application, aux pixels d'une image formée par une carte tirée d'une base de données d'élévation du terrain, d'une transformée de distance qui utilise un masque de chanfrein répertoriant les distances d'un pixel en analyse par rapport aux pixels les plus proches dits pixels du voisinage et qui a des axes de propagation orientés comme les directions des pixels du voisinage par rapport au pixel en analyse dans le masque de chanfrein, l'obstacle supplémentaire tenant compte de la mobilité de l'aéronef est privé d'un secteur angulaire partant d'un pixel proche du mobile, pris pour origine des mesures de distance, correspondant au secteur angulaire orienté selon l'axe

35

de propagation le plus proche de la direction du mouvement du mobile et délimité par des bissectrices des angles formés par les axes de propagation.

5 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront d'un mode de réalisation donné à titre d'exemple. Cette description sera faite en regard du dessin dans lequel :

- 10 - une figure 1 représente un exemple de carte de distances couvrant une zone où évolue un mobile et ayant la position du mobile comme origine des mesures de distance,
- une figure 2 représente un exemple de masque de chanfrein utilisable par une transformée de distance par propagation,
- des figures 3a et 3b montrent les cellules du masque de chanfrein illustré à la figure 2, qui sont utilisées dans une passe de balayage
15 selon l'ordre lexicographique et dans une passe de balayage selon l'ordre lexicographique inverse,
- une figure 4 représente une partie de carte de distances centrée sur la position instantanée du mobile montrant la position et une forme possible d'un obstacle supplémentaire placé conformément
20 à l'invention pour que les estimations de distance faites dans la carte de distances tiennent compte des limitations de manœuvrabilité du mobile,
- une figure 5 illustre les relations existantes entre la route et le cap suivis par un aéronef,
- 25 - une figure 6 illustre, dans un repère air lié à un aéronef, les domaines de forme circulaire, qui sont inaccessibles pour l'aéronef en raison des limites de sa manœuvrabilité,
- une figure 7 montre la trace au sol des domaines d'inaccessibilité représentés à la figure 1,
- 30 - une figure 8 représente une partie de carte de distances centrée sur la position instantanée du mobile montrant la position et une autre forme possible d'un obstacle supplémentaire placé conformément à l'invention pour que les estimations de distance faites dans la carte de distances tiennent compte des limitations de
35 manœuvrabilité du mobile,

- une figure 9 illustre une façon de répertorier les cellules de la carte de distances appartenant à l'obstacle supplémentaire placé conformément à l'invention,
- une figure 10 illustre les directions et secteurs angulaires définis par un masque de chanfrein tel que celui de la figure 2,
- des figures 11 et 12 illustrent les problèmes posés par l'anisotropie affectant une carte extraite d'une base de données d'élévation du terrain à maillage régulier en latitude et longitude, et
- une figure 13 montre l'effet d'une correction de l'anisotropie par étirement sur une carte extraite d'une base de données d'élévation du terrain à maillage régulier en latitude et longitude après correction de l'anisotropie.

Une carte de distances sur une zone d'évolution est formée de l'ensemble des valeurs des distances des points placés aux nœuds d'un maillage régulier de la zone d'évolution par rapport à un point de la zone pris pour origine des mesures de distance. Comme montré à la figure 1, elle peut être présentée sous la forme d'un tableau de valeurs dont les cases correspondent à un découpage de la zone d'évolution en cellules centrées sur les nœuds du maillage. Le maillage régulier adopté est souvent celui des points d'une base de données d'élévation du terrain couvrant la zone d'évolution. Le point de la zone pris pour origine des mesures de distance est le nœud du maillage le plus proche de la projection au sol de la position instantanée du mobile.

Les cartes de distances sont souvent réalisées en utilisant une transformée de distance par propagation également connue sous la dénomination de transformée de distance de chanfrein.

Les transformées de distance de chanfrein sont apparues initialement en analyse d'image pour estimer des distances entre objets. Gunilla Borgefors en décrit des exemples dans son article intitulé "Distance Transformation in Digital Images." paru dans la revue : Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 34 pp. 344-378 en février 1986.

La distance d'entre deux points d'une surface est la longueur minimale de tous les parcours possibles sur la surface partant de l'un des points et aboutissant à l'autre. Dans une image formée de pixels répartis

selon un maillage régulier de lignes, colonnes et diagonales, une transformée de distance par propagation estime la distance d'un pixel dit pixel "but" par rapport à un pixel dit pixel "source" en construisant progressivement, en partant du pixel source, le plus court trajet possible
5 suivant le maillage des pixels et aboutissant au pixel but, et en s'aidant des distances trouvées pour les pixels de l'image déjà analysés et d'un tableau dit masque de chanfrein répertoriant les valeurs des distances entre un pixel et ses proches voisins.

Comme montré à la figure 2, un masque de chanfrein se présente
10 sous la forme d'un tableau avec une disposition de cases reproduisant le motif d'un pixel entouré de ses proches voisins. Au centre du motif, une case affectée de la valeur 0 repère le pixel pris pour origine des distances répertoriées dans le tableau. Autour de cette case centrale, s'agglomèrent des cases périphériques remplies de valeurs de distance de proximité non
15 nulles et reprenant la disposition des pixels du voisinage d'un pixel supposé occuper la case centrale. La valeur de distance de proximité figurant dans une case périphérique est celle de la distance séparant un pixel occupant la position de la case périphérique concernée, d'un pixel occupant la position de la case centrale. On remarque que les valeurs de distance de proximité se répartissent en cercles concentriques. Un premier cercle de quatre cases
20 correspondant aux quatre pixels de premier rang, qui sont les plus proches du pixel de la case centrale, soit sur la même ligne, soit sur la même colonne, sont affectées d'une valeur de distance de proximité D1. Un deuxième cercle de quatre cases correspondant aux quatre pixels de
25 deuxième rang, qui sont pixels les plus proches du pixel de la case centrale placés sur les diagonales, sont affectées d'une valeur de distance de proximité D2. Un troisième cercle de huit cases correspondant aux huit pixels de troisième rang, qui sont les plus proches du pixel de la case centrale tout en restant en dehors de la ligne, de la colonne et des diagonales occupées
30 par le pixel de la case centrale, sont affectées d'une valeur de distance de proximité D3.

Le masque de chanfrein peut couvrir un voisinage plus ou moins étendu du pixel de la case centrale en répertoriant les valeurs des distances de proximité d'un nombre plus ou moins important de cercles concentriques
35 de pixels du voisinage. Il peut être réduit aux deux premiers cercles formés

par les pixels du voisinage d'un pixel occupant la case centrale comme dans l'exemple des cartes de distances des figures 1 ou être étendu au-delà des trois premiers cercles formés par les pixels du voisinage du pixel de la case centrale. Il est habituel de s'arrêter à trois premiers cercles comme pour le masque de chanfrein montré à la figure 2. Ce n'est que dans un but de simplification que l'on s'est arrêté au deux premiers cercles pour la carte de distances de la figure 1.

Les valeurs des distances de proximité D1, D2, D3 qui correspondent à des distances euclidiennes sont exprimées dans une échelle dont le facteur multiplicatif autorise l'emploi de nombres entiers au prix d'une certaine approximation. C'est ainsi que G. Borgefors adopte une échelle correspondant à un facteur multiplicatif 3 ou 5. Dans le cas d'un masque de chanfrein retenant les deux premiers cercles de valeurs de distance de proximité, donc de dimensions 3x3, G. Borgefors donne, à la première distance de proximité D1 qui correspond à un échelon en abscisse ou en ordonnées et également au facteur multiplicatif d'échelle, la valeur 3 et, à la deuxième distance de proximité qui correspond à la racine de la somme des carrés des échelons en abscisse et en ordonnée $\sqrt{x^2 + y^2}$, la valeur 5. Dans le cas d'un masque de chanfrein retenant les trois premiers cercles, donc de dimensions 5x5, elle donne, à la distance D1 qui correspond au facteur multiplicatif d'échelle, la valeur 5, à la distance D2, la valeur 7 qui est une approximation de $5\sqrt{2}$, et à la distance D3 la valeur 11 qui est une approximation de $5\sqrt{5}$.

La construction progressive du plus court trajet possible allant à un pixel but en partant d'un pixel source et en suivant le maillage des pixels se fait par un balayage régulier des pixels de l'image au moyen du masque de chanfrein.

Initialement, les pixels de l'image se voient affecter une valeur de distance infinie, en fait un nombre suffisamment élevé pour dépasser toutes les valeurs des distances mesurables dans l'image, à l'exception du pixel source qui se voit affecter une valeur de distance nulle. Puis les valeurs initiales de distance affectées aux points but sont mises à jour au cours du balayage de l'image par le masque de chanfrein, une mise à jour consistant à remplacer une valeur de distance attribuée à un point but, par une nouvelle

valeur moindre résultant d'une estimation de distance faite à l'occasion d'une nouvelle application du masque de chanfrein au point but considéré.

Une estimation de distance par application du masque de chanfrein à un pixel but consiste à répertorier tous les trajets allant de ce pixel but au pixel source et passant par un pixel du voisinage du pixel but dont la distance a déjà été estimée au cours du même balayage, à rechercher parmi les trajets répertoriés, le ou les trajets les plus courts et à adopter la longueur du ou des trajets les plus courts comme estimation de distance. Cela se fait en plaçant le pixel but dont on veut estimer la distance dans la case centrale du masque de chanfrein, en sélectionnant les cases périphériques du masque de chanfrein correspondant à des pixels du voisinage dont la distance vient d'être mise à jour, en calculant les longueurs des trajets les plus courts reliant le pixel but à mettre à jour au pixel source en passant par un des pixels sélectionnés du voisinage, par addition de la valeur de distance affectée au pixel du voisinage concerné et de la valeur de distance de proximité donnée par le masque de chanfrein, et à adopter, comme estimation de distance, le minimum des valeurs de longueur de trajet obtenues et de l'ancienne valeur de distance affectée au pixel en cours d'analyse.

Au niveau d'un pixel en analyse par le masque de chanfrein, la recherche progressive des plus courts trajets possibles partant d'un pixel source et allant aux différents pixels but de l'image donne lieu à un phénomène de propagation en directions des pixels qui sont les voisins les plus proches du pixel en analyse et dont les distances sont répertoriées dans le masque de chanfrein. Dans le cas d'une répartition régulière des pixels de l'image, les directions des plus proches voisins d'un pixel ne variant pas sont considérées comme des axes de propagation de la transformée de distance à masque de chanfrein qui prend souvent elle-même, l'appellation de transformées de distance par propagation.

L'ordre de balayage des pixels de l'image influe sur la fiabilité des estimations de distance et de leurs mises à jour car les trajets pris en compte en dépendent. En fait, il est soumis à une contrainte de régularité qui fait que si les pixels de l'image sont repérés selon l'ordre lexicographique (pixels classés dans un ordre croissant ligne par ligne en partant du haut de l'image et en progressant vers le bas de l'image, et de gauche à droite au sein d'une

ligne), et si un pixel p a été analysé avant un pixel q alors un pixel $p+x$ doit être analysé avant le pixel $q+x$. Les ordres lexicographique, lexicographique inverse (balayage des pixels de l'image ligne par ligne de bas en haut et, au sein d'une ligne, de droite à gauche), lexicographique transposé (balayage
5 des pixels de l'image colonne par colonne de gauche à droite et, au sein d'une colonne, de haut en bas), lexicographique transposé inverse (balayage des pixels par colonnes de droite à gauche et au sein d'une colonne de bas en haut) satisfont cette condition de régularité et plus généralement tous les
10 balayages dans lesquels les lignes et colonnes sont balayées de droite à gauche ou de gauche à droite. G. Borgefors préconise un double balayage des pixels de l'image, une fois dans l'ordre lexicographique et une autre dans l'ordre lexicographique inverse.

La figure 3a montre, dans le cas d'une passe de balayage selon l'ordre lexicographique allant du coin supérieur gauche au coin inférieur droit
15 de l'image, les cases du masque de chanfrein de la figure 1 utilisées pour répertorier les trajets allant d'un pixel but placé sur la case centrale (case indexée par 0) au pixel source en passant par un pixel du voisinage dont la distance a déjà fait l'objet d'une estimation au cours du même balayage. Ces cases sont au nombre de huit, disposées dans la partie supérieure gauche
20 du masque de chanfrein. Il y a donc huit trajets répertoriés pour la recherche du plus court dont la longueur est prise pour estimation de la distance.

La figure 3b montre, dans le cas d'une passe de balayage selon l'ordre lexicographique inverse allant du coin inférieur droit au coin supérieur gauche de l'image, les cases du masque de chanfrein de la figure 1 utilisées
25 pour répertorier les trajets allant d'un pixel but placé sur la case centrale (case indexée par 0) au pixel source en passant par un pixel du voisinage dont la distance a déjà fait l'objet d'une estimation au cours du même balayage. Ces cases sont complémentaires de celles de la figure 2a. Elles sont également au nombre de huit mais disposées dans la partie inférieure
30 droite du masque de chanfrein. Il y a donc encore huit trajets répertoriés pour la recherche du plus court dont la longueur est prise pour estimation de la distance.

La carte de distances montrée à la figure 1 est un exemple simplifié facilitant la compréhension du problème auquel s'attaque l'invention.
35 Cette carte de distances couvre une zone avec deux obstacles

infranchissables 10 et 11, où évolue un mobile sensé être au point S et se déplacer dans le sens de la flèche. Elle a été établie à l'aide de la plus simple des transformées de distance proposées par Gunilla Borgefors, utilisant un masque de chanfrein de dimension 3x3 avec deux distances de voisinage 3, 4.

Les estimations de distance sont faites indépendamment du mouvement du mobile et ne tiennent pas compte de l'incapacité du mobile à suivre certains parcours pour des raisons de manœuvrabilité. Lorsqu'un mobile doit effectuer un parcours d'adaptation pour se mettre en situation de pouvoir rejoindre un point de la carte de distances, ce parcours d'adaptation fausse l'estimation de distance car il peut rendre le trajet effectif parcouru par le mobile nettement plus long que le trajet de longueur minimale ayant servi à l'estimation de distance. C'est particulièrement le cas pour les points situés dans le proche voisinage du mobile mais dans des directions éloignées de celle de son mouvement du moment. Par exemple, dans l'exemple de carte de distances illustré à la figure 1, les cellules 13 et 14 qui sont les plus proches voisines de la cellule occupée par la position instantanée du mobile (point S) ont la même estimation de distance 3 alors que l'une est dans la direction du mouvement du mobile (flèche) et l'autre dans la direction inverse. Si l'on considère que le mobile est un aéronef, il parvient sans encombre à la cellule 13, puisqu'il n'a aucune manœuvre à effectuer pour l'atteindre. A l'inverse, il lui est difficile d'atteindre la cellule 14 car il lui faut faire un tour complet avant de pouvoir envisager de la rejoindre. L'obligation d'effectuer ce tour complet pour des raisons de manœuvrabilité rend irréaliste l'estimation de distance de la cellule 14.

Plus généralement, les estimations de distance faites en prenant en compte des trajets de longueur minimale inaccessibles au mobile en raison de sa manœuvrabilité limitée sont rendues plus ou moins irréalistes en fonction de l'importance relative de la longueur du trajet d'adaptation qui a été négligé.

Pour éviter cet inconvénient, on propose, comme représenté à la figure 4, d'ajouter aux obstacles infranchissables (10, 11 figure 1) un nouvel obstacle infranchissable 20, répertoriant les cellules de la carte de distances inaccessibles au mobile du fait de ses limites de manœuvrabilité. Ce nouvel obstacle infranchissable 20, est lié au mobile et disposé dans son voisinage

proche. Il est de forme concave, la cellule (point S) contenant la position instantanée du mobile étant placée dans sa concavité tournée dans la direction du déplacement du mobile. Il présente une forme générale en demi-lune ou en U. Ce nouvel obstacle infranchissable 20, qui se déplace avec le mobile, complète les obstacles à contourner (10, 11 figure 1) et oblige la transformation de distance à écarter, dans sa recherche des longueurs des plus courts chemins, les chemins hors de portée du mobile du fait de sa manœuvrabilité limitée. Pour un aéronef, il s'agit d'interdire les demi-tours irréalistes, les virages trop accentués et même de tenir compte des conditions locales de vent.

Pour rendre une carte de distances encore plus réaliste dans le cas d'un aéronef, il est intéressant de préciser davantage la forme de ce nouvel obstacle infranchissable 20 lié à l'aéronef et à la direction de son mouvement par rapport à la carte donc par rapport au sol en répertoriant les cellules de la carte de distances qui sont placées au voisinage de l'aéronef tout en lui étant inaccessibles par un trajet direct du fait de sa manœuvrabilité limitée.

Pour repérer les cellules de la carte de distances proches de l'aéronef mais inaccessibles de celui-ci par un trajet direct du fait des limites de sa manœuvrabilité il faut tenir compte du vent local. En effet, comme montré à la figure 5, la direction au sol du mouvement d'un aéronef, qui est celle de sa vitesse sol GS orientée selon sa route (track en anglo-saxon) de vecteur unitaire \vec{i} , correspond à la direction de la somme vectorielle du vecteur vitesse air TAS de l'aéronef, orienté selon son cap (heading en anglo-saxon) de vecteur unitaire \vec{h} , et de la vitesse du vent WS (wind speed en anglo-saxon) orientée selon un vecteur unitaire \vec{w} .

Sans vent, comme montré à la figure 6, les cellules de la carte de distances placées dans le voisinage de l'aéronef tout en lui étant inaccessibles directement, sont celles contenues à l'intérieur de deux cercles 30, 31 passant par la position de l'aéronef, ayant une tangente commune orientée selon le cap de l'aéronef (vecteur \vec{Y}) et un rayon R correspondant au plus petit rayon de virage acceptable sur le moment. Ces cercles 30, 31, qui représentent les trajectoires en virage les plus serrées autorisées, d'un côté ou de l'autre, pour l'aéronef, répondent au système d'équations paramétriques :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}(t) = \begin{pmatrix} \delta . R . [1 - \cos(\omega t + \gamma)] \\ R . \sin(\omega t + \gamma) \end{pmatrix}$$

avec

$$5 \quad R = \frac{TAS^2}{g . \tan \varphi_{roll}}$$

$$\omega = \frac{TAS}{R} = \frac{g . \tan \varphi_{roll}}{TAS}$$

φ_{roll} étant l'angle de roulis de l'aéronef pendant la manœuvre,
 γ étant un facteur dépendant des conditions initiales,
 δ étant un coefficient égal à +1 pour un virage à droite et -1 pour un virage à
 10 gauche.

La vitesse air de l'aéronef, lorsqu'il parcourt ces cercles s'écrit alors:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}(t) = \begin{pmatrix} \delta . R \omega . \sin(\omega t + \gamma) \\ R \omega . \cos(\omega t + \gamma) \end{pmatrix} \quad (1)$$

En supposant le vent constant en vitesse et en direction, les
 cercles 30, 31 laissent au sol une trace en forme de cycloïde. Le système
 15 d'équations paramétriques de cette trace, peut être obtenue par intégration
 du système d'équations paramétriques de la vitesse air de parcours sur les
 cercles.

Lorsque l'on tient compte du vent, le système (1) d'équations
 paramétriques de la vitesse de l'aéronef, exprimé dans un repère sol X Y
 20 dont l'axe des ordonnées Y est orienté selon le cap de l'aéronef, devient :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}(t) = \begin{pmatrix} \delta . R \omega . \sin(\omega t + \gamma) + WS_x \\ R \omega . \cos(\omega t + \gamma) + WS_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} WS_x \\ WS_y \end{pmatrix} \text{ étant le vecteur vent}$$

Par intégration, on obtient, dans ce repère sol, le système d'équations
 paramétriques de la trace :

15

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}(t) = \begin{pmatrix} WS_x t - \delta . R . \cos(\omega t + \gamma) + C_x \\ WS_y t + R . \sin(\omega t + \gamma) + C_y \end{pmatrix}$$

C_x et C_y étant des constantes d'intégration qui dépendent du repère considéré.

- 5 Dans un repère air $X_h Y_h$ dont l'axe des ordonnées Y est orienté selon le cap (heading) de l'aéronef le système d'équations paramétriques (1) devient :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}_{t=0} = \begin{pmatrix} \delta . R \omega . \sin(\omega t + \gamma) + WS_{x_h} \\ R \omega . \cos(\omega t + \gamma) + WS_{y_h} \end{pmatrix} \quad (3)$$

10

Par intégration, il donne, dans ce repère air, le système d'équations paramétriques de la trace :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_h(t) = \begin{pmatrix} WS_{x_h} t - \delta . R . \cos(\omega t + \gamma_h) + C_{x_h} \\ WS_{y_h} t + R . \sin(\omega t + \gamma_h) + C_{y_h} \end{pmatrix} \quad (4)$$

15

La condition initiale de position est :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{t=0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

- 20 car l'aéronef est initialement au centre du repère. La condition initiale de vitesse est :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}_{t=0} = \begin{pmatrix} WS_{x_h} \\ TAS + WS_{y_h} \end{pmatrix} \quad (6)$$

car l'aéronef a un vecteur vitesse orienté initialement selon l'axe de route \vec{i} .

- 25 A l'instant initial $t=0$, le système d'équation (3) donne pour vitesse air initiale :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}_{t=0} = \begin{pmatrix} \delta . R \omega . \sin(\gamma) + WS_{x_h} \\ R \omega . \cos(\gamma) + WS_{y_h} \end{pmatrix}$$

La condition de vitesse initiale (relation 6) implique :

$$\begin{cases} \cos(\gamma_h) = 1 \\ \sin(\gamma_h) = 0 \end{cases} \Rightarrow \gamma_h = 0 \quad (7)$$

- 5 En tenant compte de ces relations (7) dans le système d'équations (4), il vient :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_h(0) = \begin{pmatrix} -\delta.R. + C_{xh} \\ C_{yh} \end{pmatrix}$$

- 10 et la condition de position initiale (relation 5) implique :

$$C_{xh} = \delta.R.$$

$$C_{yh} = 0$$

- 15 Dans un repère sol $X_t Y_t$, dont l'axe des ordonnées Y_t est orienté selon la route (track) de l'aéronef, le système d'équations paramétriques (1) devient :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}_t(t) = \begin{pmatrix} \delta.R.w.\sin(wt + \gamma_t) + WS_{xt} \\ R.w.\cos(wt + \gamma_t) + WS_{yt} \end{pmatrix}$$

- 20 Par intégration, il donne, dans ce repère sol, le système d'équations paramétriques de la trace :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_t = \begin{pmatrix} WS_{xt}.t - \delta.R.\cos(wt + \gamma_t) + C_{xt} \\ WS_{yt}.t + R.\sin(wt + \gamma_t) + C_{yt} \end{pmatrix}$$

- 25 La condition de position initiale :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_t(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

exprimant que l'aéronef est initialement au centre du repère, et celle de vitesse initiale :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}_t(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ GS \end{pmatrix}$$

- 5 exprimant que l'aéronef a un vecteur vitesse orienté initialement selon l'axe de route \vec{i} conduisent aux valeurs de constantes d'intégration :

$$C_{xi} = \delta . R . \cos(\gamma_i)$$

$$C_{yi} = -R . \sin(\gamma_i)$$

$$\gamma_i = -\delta . (Track - Heading)$$

10

Dans le repère géographique $X_g Y_g$, utilisé par la carte de distances, le système d'équations paramétriques (1) devient :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}_g(t) = \begin{pmatrix} \delta . R w . \sin(wt + \gamma_g) + WS_{x_g} \\ R w . \cos(wt + \gamma_g) + WS_{y_g} \end{pmatrix}$$

15

Par intégration, il donne, dans ce repère géographique, le système d'équations paramétriques de la trace :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_g = \begin{pmatrix} WS_{x_g} t - \delta . R . \cos(wt + \gamma_g) + C_{x_g} \\ WS_{y_g} t + R . \sin(wt + \gamma_g) + C_{y_g} \end{pmatrix}$$

20

La condition de position initiale :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_g(0) = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix}$$

et la condition de vitesse initiale :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}_g(0) = \begin{pmatrix} GS . \sin(track) \\ GS . \cos(track) \end{pmatrix}$$

- 25 conduisent aux valeurs de constantes d'intégration :

$$C_{Xt} = \delta . R . \cos(\gamma_g)$$

$$C_{Yt} = -R . \sin(\gamma_g)$$

$$\tan g(\gamma_g) = -\delta . \tan(Heading)$$

ou encore :

$$5 \quad C_{Xg} = Long + \delta . R . \cos(\gamma_g)$$

$$C_{Yg} = Lat - R . \sin(\gamma_g)$$

$$\gamma_g = \delta . Heading + k . \Pi$$

10 En fait, l'aéronef ne suit les traces au sol des deux cercles (30, 31 figure 5) que le temps nécessaire à une manœuvre de changement de route et de cap.

Le temps de transition pour changer de cap dépend de la vitesse angulaire de l'avion et donc de son angle de roulis.

$$15 \quad T_{transition} = \frac{H_2 - H_1}{w}$$

avec :

$$w = \frac{TAS}{R} = \frac{g . \tan \varphi_{roll}}{TAS}$$

20 Le changement de route (track) dépend en plus des conditions de vent. Le cap (heading) final s'écrit

$$Heading_{final} = \begin{cases} Track_{final} - a \sin\left(\frac{WS_{x_{final}}}{TAS}\right) + 2.(k+1).\Pi \\ Track_{final} + a \sin\left(\frac{WS_{x_{final}}}{TAS}\right) + 2.k.\Pi \end{cases}$$

et la durée du temps de transition pour changer de route :

$$T_{transition} = \frac{|Heading_{final} - Heading_{initial}|}{W}$$

En final, pour déterminer les cellules de la carte de distances appartenant à l'obstacle infranchissable (20 figure 4) car considérées comme
 5 inaccessibles pour l'aéronef du fait de sa manœuvrabilité limitée, on trace, comme montré à la figure 7, un contour fermé formé des deux parties 40, 40' des traces au sol des deux cercles (30, 31 figure 5) partant de la position initiale de l'aéronef (point S) jusqu'aux points P, P' correspondant à un changement de route donné, par exemple, 180° et des deux droites 41, 41' joignant les extrémités P, P' des deux parties de trace 40, 40' à la position
 10 initiale de l'aéronef (point S). Cela donne à l'obstacle infranchissable lié à l'aéronef, une forme à deux lobes en aile de papillon. Une fois le contour déterminé, on sélectionne pour l'obstacle, les cellules contenues dans le contour en négligeant celles situées au devant de la position initiale de
 15 l'aéronef, dans le sens de son déplacement.

Une manière de sélectionner pour l'obstacle les cellules contenues dans un contour qui a été déterminé au préalable en évitant les cellules situées au devant de la position initiale de l'aéronef, dans le sens de son déplacement consiste, comme représenté à la figure 8, à ne prendre que
 20 celles entièrement situées dans le contour et à ne pas considérer celles qui n'y sont que partiellement contenues.

Pour répertorier les cellules contenues dans un contour fermé, on peut, comme représenté à la figure 9, choisir une cellule X que l'on sait à l'intérieur du contour, faire décrire le contour par un point mobile Z et
 25 assimiler les cellules traversées par le segment de droite XZ aux cellules contenues dans le contour.

Pour améliorer la propagation d'une transformée de distance à masque de chanfrein et obtenir plus rapidement, par balayage, des estimations de distance stables sur l'ensemble des cellules de la carte de la zone représentée, il est avantageux d'exclure de l'obstacle supplémentaire
 30 lié à l'aéronef pour tenir compte de sa manœuvrabilité, les cellules de la carte appartenant en totalité ou en partie à un secteur angulaire partant de la position actuelle de l'aéronef et ayant son ouverture tournée en direction de la route suivie par l'aéronef. En effet, le fait de dégager de tout obstacle ces

cellules permet de laisser libres, au niveau de la position actuelle de l'aéronef et donc du pixel pris pour origine des mesures de distance, un ou plusieurs axes de propagation de la transformée de distance de chanfrein ayant des orientations proches de celle du mouvement de l'aéronef, ce qui augmente
5 les possibilités de tracé, au voisinage de la position actuelle de l'aéronef, donc du pixel source, pour les chemins allant des pixels but au pixel source et renforce les chances de trouver rapidement un trajet de longueur minimale au cours du balayage effectué par le masque de chanfrein.

Le secteur angulaire de délimitation des cellules laissées libres de
10 propagation est choisi comme étant celui des secteurs angulaires délimités, par les bissectrices des angles formés par les axes de propagation tracés au niveau du pixel le plus proche de la position actuelle de l'aéronef, pris comme pixel source, origine pour les mesures de distance, ayant l'orientation la plus proche de celle du mouvement de l'aéronef.

15 La figure 10 montre une partie du faisceau des axes de propagation définie par les pixels de l'image concernés par le quart haut droit du masque de chanfrein de la figure 2 appliqué au pixel C00 pris comme origine des mesures de distance car supposé le plus proche de la position actuelle de l'aéronef. On y distingue les pixels de premier rang C01 et C10
20 voisins immédiats du pixel en analyse C00 sur la même ligne ou la même colonne, le pixel de deuxième rang C11, voisin immédiat du pixel en analyse C00 sur la première diagonale, les pixels de troisième rang C12 et C21 voisins immédiats du pixel en analyse C00 mais ni sur une même ligne, ni sur une même colonne et ni sur une même diagonale de celui-ci. Les
25 diverses orientations de ces pixels de premier, deuxième et troisième rangs C01, C10, C11, C12, C21, voisins immédiats du pixel en analyse C00 définissent les seules directions possibles de propagation pour la transformée de distance dans le quart haut droit du masque de chanfrein en fait le quart nord est pour une image de carte dont le haut est tourné vers le
30 nord et la droite vers l'est. Ces cinq directions de propagation représentées sur la figure 10 par des traits appuyés et fléchés se complètent par symétries horizontale et verticale.

La direction D0 de la propagation du pixel C00 en analyse vers le
pixel C10 de premier rang sur la même colonne sert de référence angulaire
35 et correspond, dans le langage du jeu d'échec, à un mouvement d'une tour.

La direction D1 de la propagation du pixel C00 en analyse vers le pixel de troisième rang C21 disposé sur des ligne, colonne et diagonale différentes est angulairement la plus proche de la direction D0. Avec un maillage régulier des pixels, c'est-à-dire en l'absence d'anisotropie de l'image de carte, elle fait un angle de 26,5 degrés par rapport à cette dernière et correspond dans le langage du jeu d'échec à un mouvement d'un cavalier. La direction D2 de la propagation du pixel C00 en analyse vers le pixel C11 de deuxième rang sur la même diagonale est un peu plus écartée. En l'absence d'anisotropie de l'image de carte, elle fait un angle de 45 degrés par rapport à la direction de référence D0. Elle correspond dans le langage du jeu d'échec à un mouvement d'un fou. La direction D3 de la propagation du pixel C00 en analyse vers le pixel de troisième rang C12 disposé sur des ligne, colonne et diagonale différentes est encore plus écartée. En l'absence d'anisotropie de l'image, elle fait un angle de 63,5 degrés par rapport à la direction de référence D0. Elle correspond dans le langage du jeu d'échec à un mouvement d'un cavalier. Enfin la direction D4 de la propagation du pixel C00 en analyse vers le pixel de premier rang C01 sur la même ligne est la plus écartée et fait un angle de 90 degrés par rapport à la direction de référence D. Elle correspond dans le langage du jeu d'échec à un mouvement d'une tour.

Les bissectrices des angles formés par ces cinq directions de propagation D0, D1, D2, D3 et D4 découpent dans le quart haut droit du masque de chanfrein cinq secteurs circulaires centrés sur le pixel C00 en analyse et tournés dans les cinq directions de propagation à savoir :

- un secteur angulaire dit C10 tour car il est orienté vers le pixel C10, selon la direction D0 correspondant au mouvement d'une tour,
- un secteur angulaire dit C21 cavalier car il est orienté vers le pixel C21, selon la direction D1 correspondant au mouvement d'un cavalier,
- un secteur angulaire dit C11 fou car il est orienté vers le pixel C11, selon la direction D2 correspondant au mouvement d'un fou,
- un secteur angulaire dit C12 cavalier car il est orienté vers le pixel C12, selon la direction D3 correspondant au mouvement d'un cavalier, et
- un secteur angulaire dit C01 tour car il est orienté vers le pixel C01,

selon la direction D4 correspondant au mouvement d'une tour.

Le tableau suivant répertorie ces cinq secteurs angulaires :

5

Secteur	Limite inf.	Limite Sup.
C10 Tour	-13.25	13.25
C21 Cavalier	26.5 - 13.25	26.5+9.25
C11 Fou	45 - 9.25	45 + 9.25
C12 Cavalier	63.5 - 9.25	63.5 + 13.25
C01 Tour	90 - 13.25	90+13.25

10 Ainsi, avec un aéronef en mouvement en direction du quart haut droit de la carte, on choisit celui de ces cinq secteurs angulaires dont l'orientation correspond au mieux à celle de la route de l'aéronef.

15 Dans le cas d'une l'image de carte extraite d'une base de données d'élévation du terrain à maillage régulier en longitude et en latitude de la surface terrestre, il est préférable de tenir compte de l'anisotropie introduite par le resserrement progressif des méridiens en directions des pôles. En effet, comme le montrent les figures 11 et 12, une telle carte présente un
 20 maillage de cellules de largeur variable, passant d'une forme carrée au niveau de la latitude 0° (figure 11) à une forme nettement rectangulaire au niveau de la latitude 53° (figure 12) impliquant qu'un aéronef suivant une même orientation de route (track) à la même vitesse sol ne franchit pas les
 25 mêmes cellules dans le même temps.

Pour tenir compte de cette anisotropie dont l'importance varie en fonction de la latitude, on propose d'étirer artificiellement la carte pour ramener son maillage de cellules à une forme carrée. Comme montré à la figure 13, le vecteur unitaire de l'axe des ordonnées du repère d'orientation
 30 n'est pas touché par cet étirement réalisé dans une direction qui lui est perpendiculaire. Le vecteur unitaire de l'axe des ordonnées avant étirement Y_{Earth} reste égal au vecteur unitaire Y_{Grid} après étirement tandis que le vecteur unitaire de l'axe des abscisses avant étirement X_{Earth} se retrouve, après étirement, dilaté dans la proportion de $1/\cos(\text{Latitude})$:

30

$$\begin{cases} Y_{Grid} = Y_{Earth} \\ X_{Grid} = \frac{X_{Earth}}{\cos(Latitude)} \end{cases}$$

Il en résulte que la nouvelle orientation de la route de l'aéronef à prendre en considération après l'étirement (TrackOnGrid) est liée à
 5 l'orientation réelle de la route de l'aéronef (Track) par la relation :

$$TrackOnGrid = \arctan\left(\frac{\tan(Track)}{\cos(Latitude)}\right)$$

Bien évidemment, lorsqu'il est appliqué à des aéronefs, le procédé
 10 d'estimation de distance curviligne qui vient d'être décrit, tient compte du profil vertical de vol, les contours des obstacles à contourner étant mis à jour en fonction du temps de parcours des trajets testés lors de la recherche des plus courts chemins dont les longueurs sont prises pour estimations des distances, afin de tenir compte de l'altitude atteinte à chaque instant déduite
 15 du profil vertical du vol.

REVENDICATIONS

1. Procédé d'estimation de distance curviligne au sein d'une zone
5 où évolue un mobile à manœuvrabilité limitée et qui renferme des obstacles
éventuels à contourner, zone dite zone d'évolution, dans lequel est établie
une carte de distances couvrant la zone d'évolution et ayant pour origine des
mesures de distance la position instantanée (S) du mobile, caractérisé en ce
qu'il consiste, lors de l'établissement de la carte de distances, à compléter
10 les obstacles éventuels à contourner (10, 11) par un obstacle supplémentaire
à contourner (20) placé au voisinage du mobile et lié au mobile, répertoriant
des étendues du proche voisinage du mobile, considérées comme
inaccessibles pour le mobile du fait de sa manœuvrabilité limitée.

15 2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que
l'obstacle supplémentaire (20) est de forme concave et disposé dans le
voisinage de la position instantanée (S) du mobile de manière que sa
concavité soit tournée dans la direction du déplacement du mobile et englobe
la position instantanée (S) du mobile.

20 3. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que
l'obstacle supplémentaire (20) a une forme en U, l'ouverture du U étant
tournée dans la direction du déplacement du mobile et englobant la position
instantanée (S) du mobile

25 4. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que
l'obstacle supplémentaire a une forme de demi-lune, l'ouverture de la demi-
lune étant tournée dans la direction de déplacement du mobile et englobant
la position instantanée (S) du mobile.

30 5. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que
l'obstacle supplémentaire (figures 7, 87, 9) a une forme à deux lobes en aile
de papillon, placés de part et d'autre de la position instantanée (S) du mobile
et ayant une tangente commune orientée dans la direction de déplacement
35 du mobile.

6. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que, lorsque le mobile est un aéronef, le contour de l'obstacle supplémentaire comporte des parties correspondant aux projections au sol de deux cercles (30, 31) liés à l'aéronef, ayant un rayon égal au rayon de courbure du virage le plus serré admis pour l'aéronef au moment considéré.

7. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que, lorsque le mobile est un aéronef soumis à un vent de travers, le contour de l'obstacle supplémentaire comporte des parties de cycloïde (figure 7) correspondant aux projections au sol de deux cercles (30, 31) liés à l'aéronef, ayant un rayon égal au rayon de courbure du virage le plus serré admis pour l'aéronef au moment considéré.

8. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que, lorsque le mobile est un aéronef soumis à un vent de travers, le contour de l'obstacle supplémentaire consiste en deux lobes de cycloïde (40, 40') limités à leurs parties allant de leur point de départ, qui est la position instantanée (S) de l'aéronef, à leur deuxième intersection (P, P') avec des droites (41, 41') allant de la position instantanée (S) de l'aéronef à des positions virtuelles (P, P') sur les lobes de cycloïdes (40, 40') correspondant pour l'aéronef à un angle de changement de route arbitraire.

9. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que, lorsque le mobile est un aéronef soumis à un vent de travers, le contour de l'obstacle supplémentaire consiste en deux lobes de cycloïde (40, 40') limités à leurs parties allant de leur point de départ, qui est la position instantanée (S) de l'aéronef, à leur deuxième intersection (P, P') avec des droites (41, 41') allant de la position instantanée (S) de l'aéronef à des positions virtuelles (P, P') sur les lobes de cycloïdes correspondant pour l'aéronef à un angle de changement de route de 180 degrés.

10. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que, lorsque le mobile est un aéronef soumis à un vent de travers et la carte de distances établie dans un repère géographique utilisant les longitudes et les latitudes, le contour de l'obstacle supplémentaire (figure 7) présente deux

parties (40, 40') en lobes de cycloïde répondant au système d'équations paramétriques :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_g = \begin{pmatrix} WS_{x_g} \cdot t - \delta \cdot R \cdot \cos(\omega t + \gamma_g) + C_{x_g} \\ WS_{y_g} \cdot t + R \cdot \sin(\omega t + \gamma_g) + C_{y_g} \end{pmatrix}$$

- 5 x et y étant les coordonnées abscisse et ordonnée d'un point dans le repère géographique de la carte de distances,

$\begin{pmatrix} WS_x \\ WS_y \end{pmatrix}$ étant le vecteur vent exprimé dans le repère géographique de la carte de distances,
avec

$$10 \quad R = \frac{TAS^2}{g \cdot \tan \phi_{roll}}$$

$$\omega = \frac{TAS}{R} = \frac{g \cdot \tan \phi_{roll}}{TAS}$$

TAS étant l'amplitude de la vitesse air de l'aéronef,

ϕ_{roll} étant l'angle de roulis de l'aéronef pendant la manœuvre,

- 15 γ étant un facteur dépendant des conditions initiales,

δ étant un coefficient égal à +1 pour un virage à droite et -1 pour un virage à gauche, et
avec

$$C_{x_g} = Long + \delta \cdot R \cdot \cos(\gamma_g)$$

$$20 \quad C_{y_g} = Lat - R \cdot \sin(\gamma_g)$$

$$\gamma_g = \delta \cdot Heading + k \cdot \Pi$$

long étant la longitude de la position instantanée de l'aéronef,

lat étant la latitude de la position instantanée de l'aéronef, et

heading étant le cap de l'aéronef.

25

11. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'obstacle supplémentaire tenant compte des limites de manœuvrabilité du

mobile est privé de la surface d'un secteur angulaire libre partant du mobile et ayant son ouverture tournée dans la direction du mouvement du mobile.

12. Procédé selon la revendication 11, caractérisé en ce que, lorsque la carte de distances se présente sous la forme d'une grille de cellules correspondant aux éléments d'une base de données d'élévation du terrain maillant le terrain d'évolution du mobile, l'obstacle supplémentaire tenant compte des limites de manœuvrabilité du mobile est privé des cellules recouvertes en totalité ou en partie le secteur angulaire libre.

10

13. Procédé selon la revendication 11, caractérisé en ce que, lorsque la carte de distances résulte de l'application, aux pixels d'une image formée par une carte tirée d'une base de données d'élévation du terrain, d'une transformée de distance qui utilise un masque de chanfrein répertoriant les distances d'un pixel en analyse par rapport aux pixels les plus proches dits pixels du voisinage et qui a des axes de propagation (D0, D1, D2, D3, D4) orientés comme les directions des pixels du voisinage par rapport au pixel en analyse dans le masque de chanfrein, le secteur angulaire libre a son ouverture orientée selon l'axe de propagation (D0, D1, D2, D3 ou D4) le plus proche de la direction du mouvement du mobile.

15

20

14. Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce que le secteur angulaire libre de propagation est délimité par des bissectrices des angles formés par les axes de propagation (D0, D1, D2, D3, D4).

25

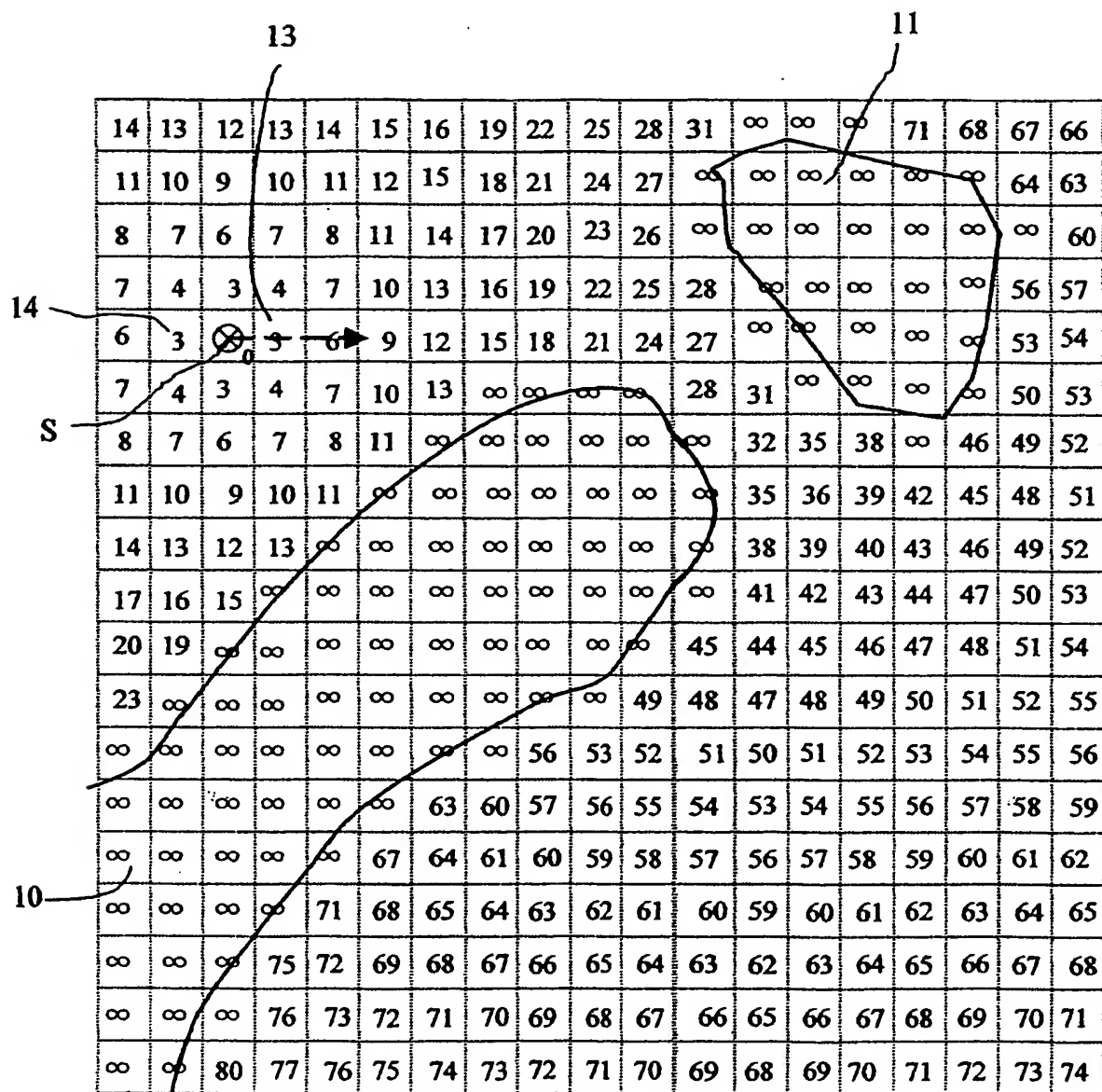


FIG.1

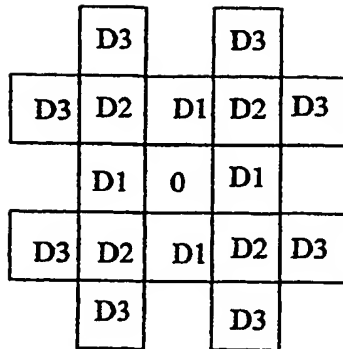


FIG. 2

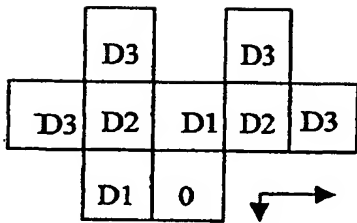


FIG. 3a

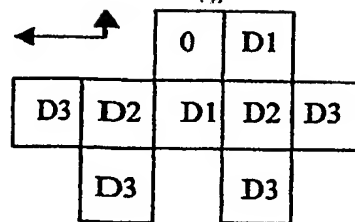


FIG. 3b

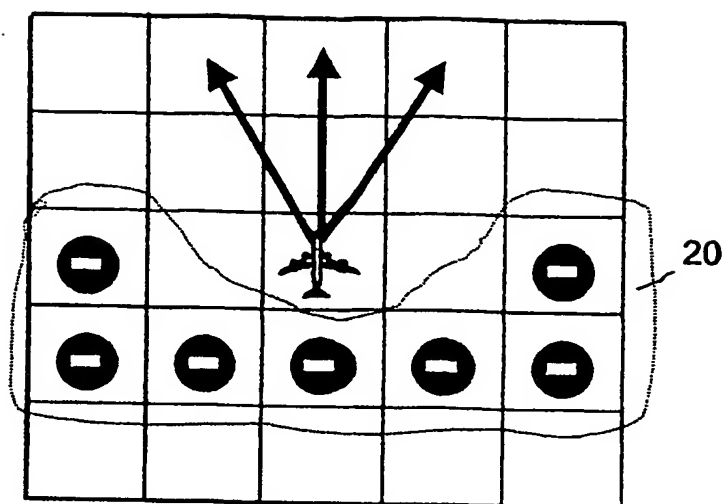


FIG. 4

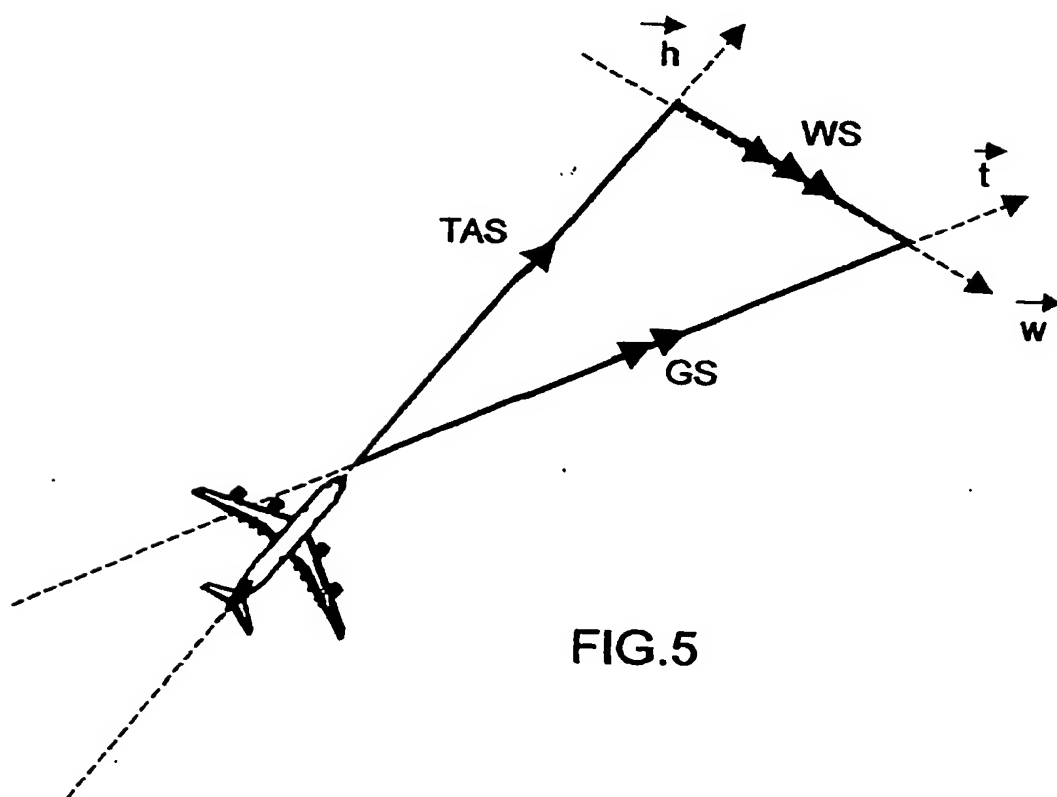


FIG. 5

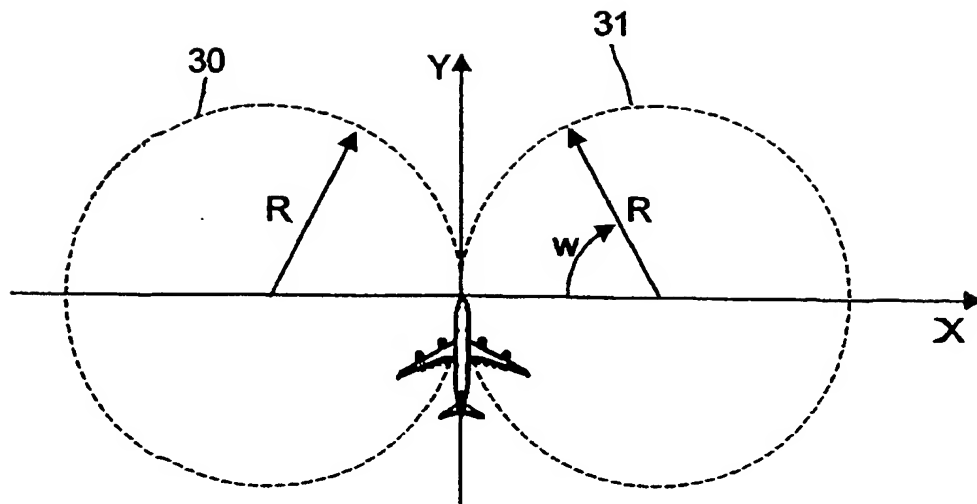


FIG. 6

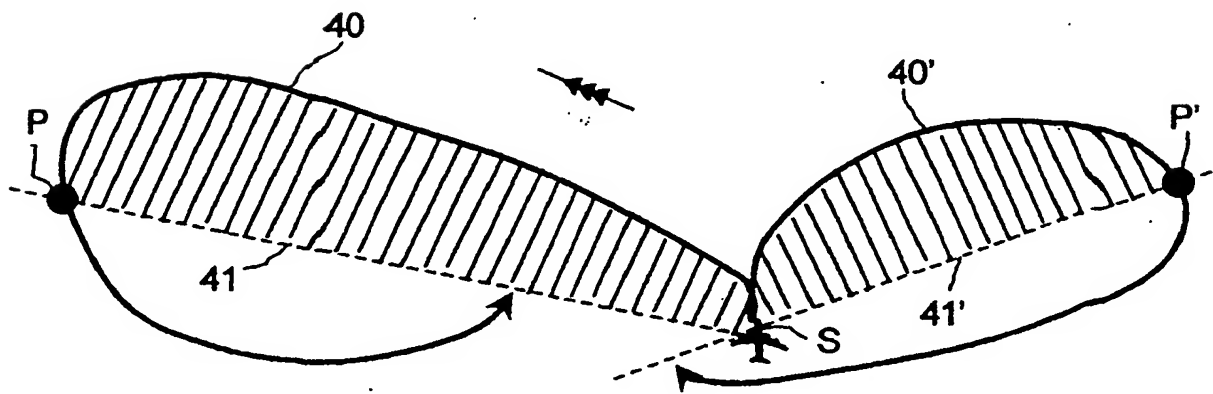


FIG. 7

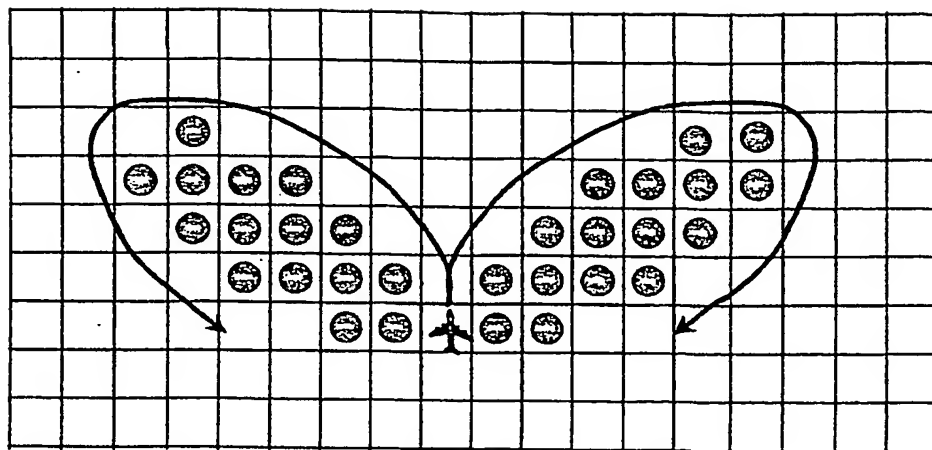


FIG. 8

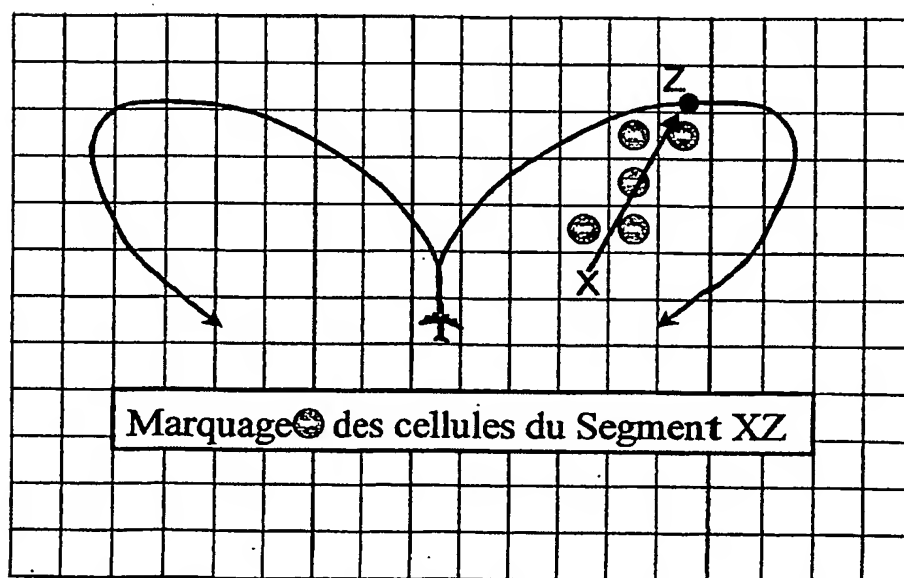


FIG. 9

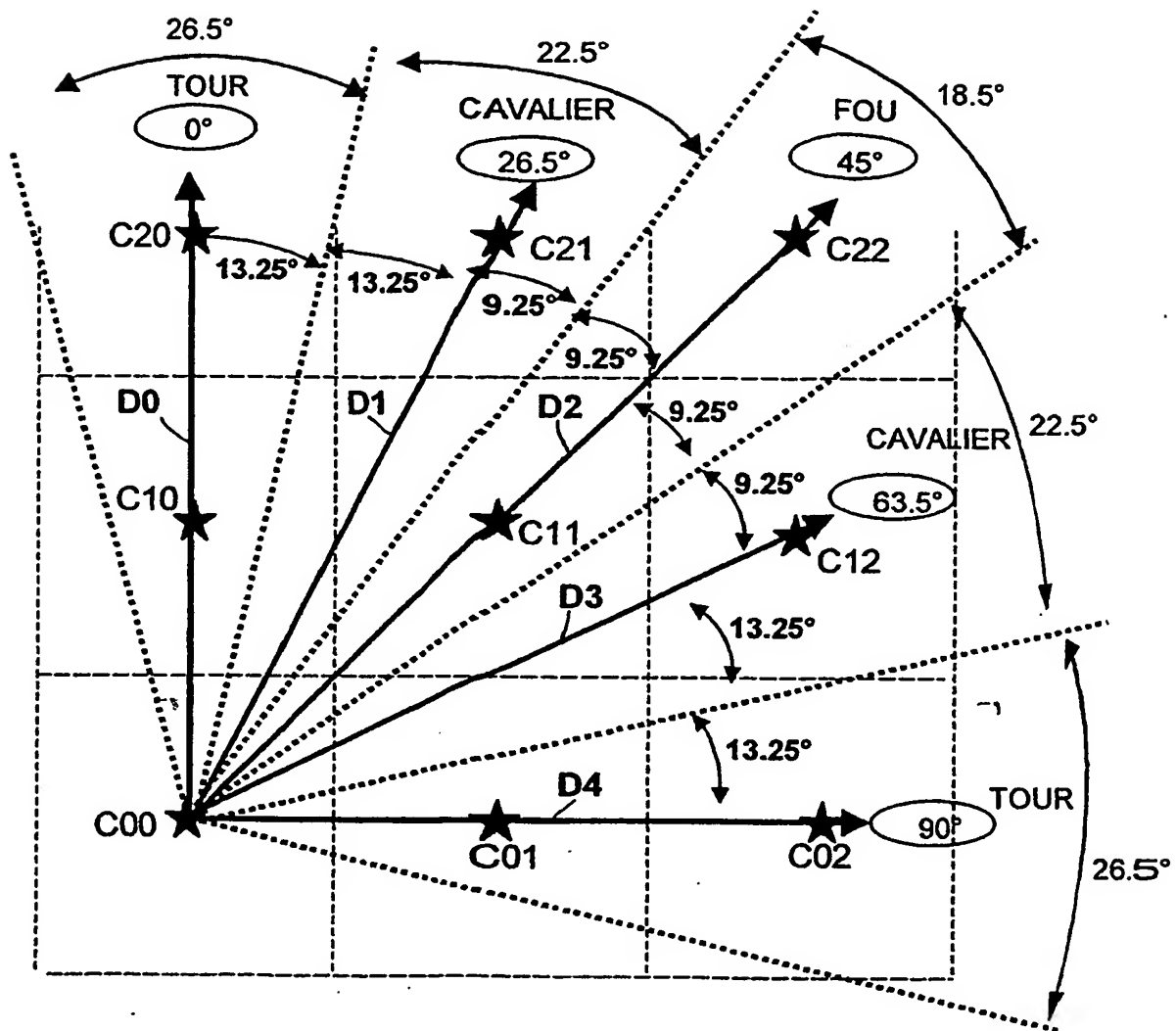


FIG.10

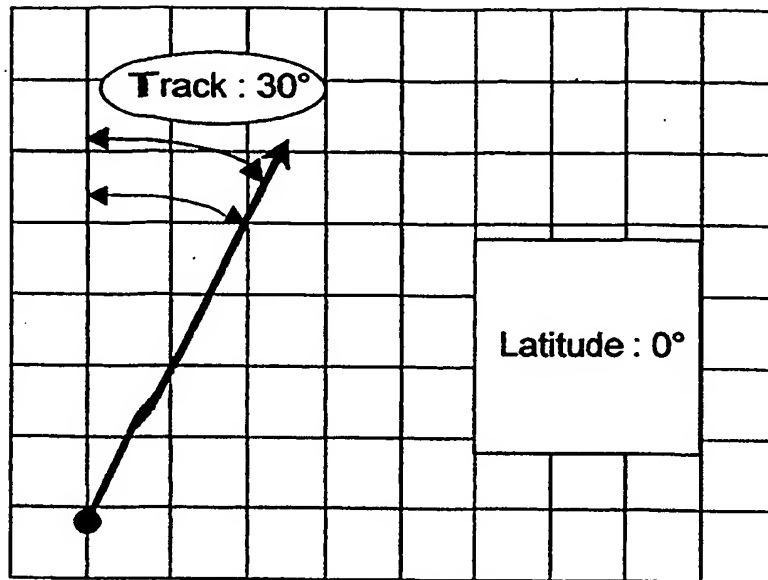


FIG. 11

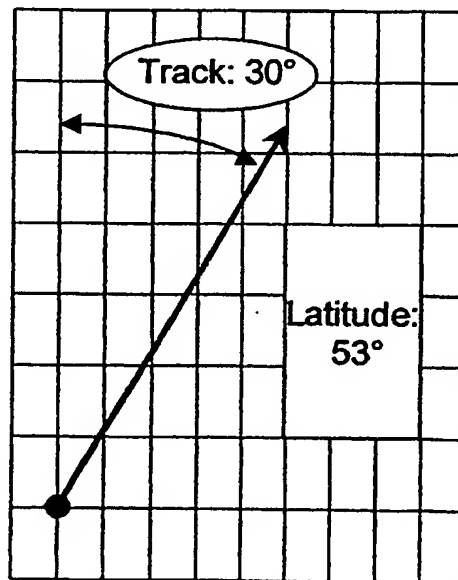


FIG. 12

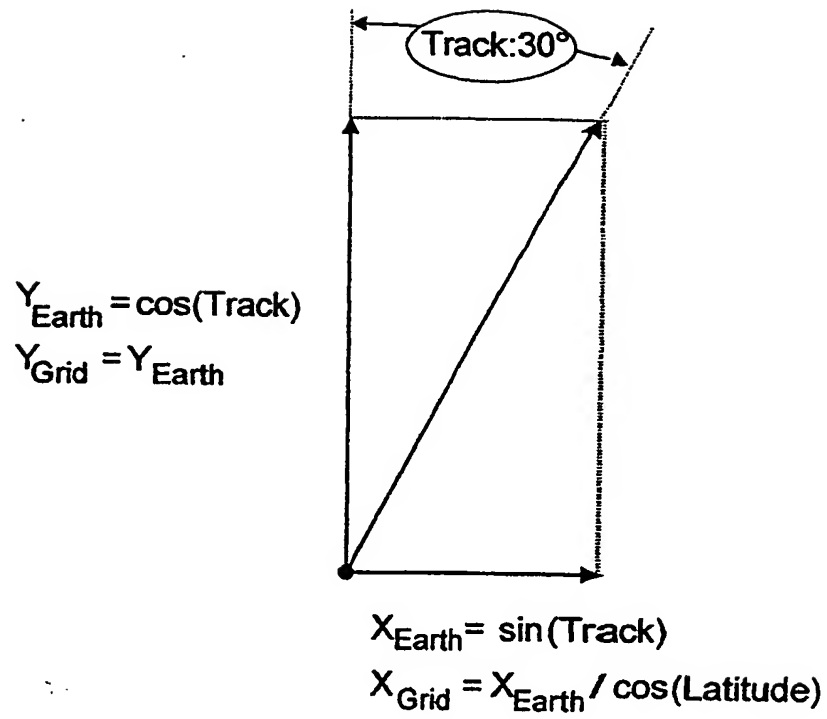


FIG.13